第48卷　第1期
2025年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48　No. 1
Jan. 2025

基于环境质量指数的塔里木河下游生态输水效益评估

艾力克木·司拉音[1]，　安外尔·艾则孜[2]，　塔吉古丽·喀斯木[2]，　史智文[2]，
胥俊宇[2,3]，　则外日古丽·克比尔[2,3]，　玉米提·哈力克[3]，　艾里西尔·库尔班[2]

（1. 新疆维吾尔自治区塔里木河干流管理局，新疆 库尔勒　841000；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐　830011；3. 新疆大学生态与环境学院，新疆 乌鲁木齐　830046）

摘　要：环境质量指数（EQI）是由气候/气象、水资源、土壤、地形地貌和生物多样性等方面的环境要素组成的，能够快速全方位定量评估自然环境总体质量的工具。基于遥感、实地监测、文献等多源数据，用熵值法、主成分分析和层次分析等方法计算EQI，对2000、2010年和2020年塔里木河下游自然环境质量进行综合评价。结果表明：(1) 在生态输水作用下，2000—2020年塔里木河下游自然环境质量有显著改善。其中，EQI相对较高的区域主要分布在近河道两岸和湖盆周边。(2) 2000—2010年环境质量改善（改善面积为15620 km^2）较2010—2020年（改善面积为13831 km^2）明显。(3) 环境质量较差及以下（EQI<0.4）和较好（EQI≥0.8）等级的EQI的增加最为明显，而环境质量差（0.4≤EQI<0.5）和良好（0.6≤EQI<0.8）等级的EQI增加不显著。生态输水量的增加显著减少了EQI偏低和中等区域面积，促进了EQI偏高的区域面积增加，说明总体上生态输水改善了研究区环境质量。

关 键 词：环境质量指数；综合评估；多源数据；塔里木河下游

文章编号：1000－6060(2025)01－0031－12(0031～0042)

作为我国最长的内陆河，塔里木河在塔里木盆地河岸生态系统稳定性和绿洲系统社会经济的可持续发展中有着举足轻重的作用[1]。它不仅推动塔里木盆地绿洲人类文明的形成和发展，而且作为东西文化的交汇地，在古丝绸之路和现在的“一带一路”路线的维持和发展有着举世无双的作用[2-3]。人口增长和社会经济发展对水资源的需求增加，引起了水资源的过度开发利用，最终导致下游断流，地下水位迅速下降[4]，天然植被衰败[5]，沙漠化和盐渍化土地面积显著增加。1970—1980年，塔里木河来水量急剧下降，从1990年的1.70×10^9 m^3下降到2005年的9.00×10^8 m^3[6-7]。每年因盐渍化造成的经济损失约1.86×10^{10}元。沙尘暴和热浪等自然灾害的强度和频率增加，沙尘暴造成的经济损失超过1.30×10^{10}元[8]，甚至最终对绿洲的自然和社会经济系统的稳定性造成重大威胁[9-10]。为了修复受损的塔里木河下游生态系统，从2000年起，国家水利部开展了综合治理修复塔里木河下游的生态输水工程。自此以来，塔里木河下游径流蔓延、植被覆盖有所改善、台特玛湖-康拉克湖泊群面积及数量显著增加、塔里木河下游生态系统有所恢复。

经过20多年的连续输水，塔里木河下游的自然环境得到了显著的改善。然而，关于“如此巨大的财力和物力投入所带来的生态效益究竟如何？不同的输水方式、时间和量对河岸林生态系统的具体影响又是怎样的？从可持续发展的视角出发，应当如何制定更为精确的对策和措施？目前的输水方式是否还有优化空间以实现更高的生态效益？”等

收稿日期：2024-02-02；　**修订日期：**2024-03-16
基金项目：国家自然科学基金(32071655)；新疆维吾尔自治区塔里木河干流管理局(TGJGLJJG2021ZXF)；新疆维吾尔自治区人社厅天池英才青年博士项目(E335030101)资助
作者简介：艾力克木·司拉音(1982-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区植被及生态遥感研究. E-mail: alkam0403@sina.com
通讯作者：艾里西尔·库尔班(1966-)，男，博士，研究员，主要从事遥感与地理信息系统应用研究. E-mail: alishir@ms.xjb.ac.cn

问题，仍需深入探索。在寻求这些问题的答案时，全面了解塔里木河下游自输水以来的生态修复效果显得尤为重要。关于塔里木河流下游生态输水工程及其生态与环境效应，已有大量研究涉及地下水位变化[11-12]、植被覆盖率和物种多样性变化[11,13-17]以及生态系统服务价值的评估[18-19]等方面。在制定相关决策时，评估指数的综合性、计算方法的可操作性以及评估结果的易读性都是至关重要的考虑因素[20-21]。尽管以往研究探讨了输水工程的生态修复效益，提供了丰富的数据和见解，但由于缺乏统一、综合的评价指标，不同研究的决策建议存在显著差异[22-24]，使得决策者在实际工作中难以应用并评估各种建议的实际成效。为了更好地指导塔里木生态输水工程的优化和改进，全面了解输水工程对塔里木河下游自然地理环境的影响，以及用综合指标来评估不同输水方式的生态修复效果显得尤为重要。环境质量指数（EQI）是由气候/气象、水资源、土壤、地形地貌和生物多样性等方面的环境要素组成的，能够快速全方位定量评估自然环境总体质量的工具。这不仅能为决策者提供更加清晰、全面的信息支持，还可为未来的生态修复工程提供有益的参考和借鉴。因此，本研究基于多源遥感时间序列数据和实际调查数据，用EQI[20]对塔里木河下游生态输水工程的修复效果进行定量分析，为提高塔里木河下游生态输水工程的修复效果提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

塔里木河是中国最长的内陆河流，全长为1321 km[25]，其中下游（恰拉至台特玛湖）长度为428 km（图1）。塔里木河下游流域属极干旱的大陆性气候[26]，年均气温、年降水量、蒸发量和太阳总辐射量分别为7.60 ℃、55 mm、2870 mm和498.7×10³ J·cm⁻³[26-28]，多为大风天气，是我国最干旱的一隅。土壤类型为风沙土、少部分胡杨林土及沼泽土。河道两侧形成了以胡杨林为主的天然绿色屏障，河岸外围区则主要为固定、半固定的流动沙丘[25]。塔里木河下游主要天然植物有胡杨（*Populus euphratica*）、多枝柽柳（*Tamarix ramosissima*）、梭梭（*Haloxylon ammodendron*）、芦苇（*Phragmites australis*）、骆驼刺（*Alhagi sparsifolia*）[29]等。

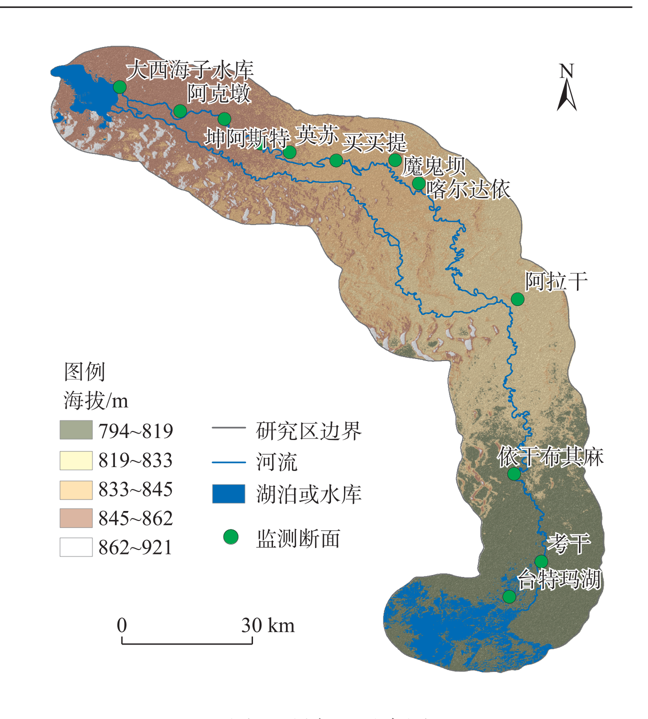


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

根据联合国环境规划署（UNEP），自然环境包含气候和气象、水文与水资源、土壤、地形地貌和生物多样性等要素[30]。因此与研究区实际情况结合，本研究建立了由17个指标组成的EQI评价指标体系（表1）。

（1）气候/气象数据

由于研究区气象监测台站少，基于气象台站的监测数据难以获取研究区气温的栅格数据。因此，本研究用MODIS地表温度数据来代替气温数据。首先，用3 km×3 km的滑动窗口对春夏秋冬昼夜地表温度及其差异进行标准差的计算。随后，用主成分分析（PCA）方法，计算地表温度的综合指数。

（2）土壤数据

首先，从国家地球系统科学数据中心地球科学数据库（https://essd.copernicus.org）和土壤栅格数据库（Soil Geodata）下载2000、2010年和2020年塔里木河下游土壤全氮、全磷、有机碳、pH、土壤湿数据。用Landsat 7/8 OLI数据计算地表湿度指数[38]、土壤含水率指数[39]。然后，基于土壤含水率指数、归一化植被指数和土壤湿度数据产品（https://engine.piesat.cn/dataset-list），用一般线性模型，将土壤湿度数据产品空间分辨率降到1 km×1 km。最后，用最大（小）值归一化法[40]对以上土壤数据进行标

表1 指标体系和数据来源

Tab. 1 Index system and data sources

自然环境要素	指标	数据来源	年份	指标属性	空间分辨率/m
气候/气象	地表温度	资源环境科学数据平台（www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=98）	2000,2010,2020	负向	1000
	地表温度标准差	用3 km×3 km的滑动窗口来计算标准差	2000,2010,2020	负向	1000
土壤	土壤湿度	PIE ENGINE网站（https://engine.piesat.cn/dataset-list）	2002,2010,2018	正向	5400
	地表湿度指数	基于Landsat 7/8 OLI计算	2000,2010,2020	正向	30
	土壤全氮	土地科学数据中心（http://soil.geodata.cn）	2000,2010,2018	正向	90
	土壤全磷	土地科学数据中心（http://soil.geodata.cn）	2000,2010,2018	正向	90
	土壤有机碳	土地科学数据中心（http://soil.geodata.cn）	2000,2010,2018	正向	90
	土壤pH	土地科学数据中心（http://soil.geodata.cn）	2000,2010,2018	正向	90
沙漠化	裸地面积	资源环境科学数据平台（www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54）	2000,2010,2020	负向	30
盐渍化地	土壤指数	基于Landsat 8 OLI计算	2000,2010,2020	负向	30
生物多样性	叶面积指数	Earth Data网站（ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov）	2000,2010,2020	正向	1000
	归一化植被指数,增强植被指数,土壤调节植被指数	基于Landsat 7/8 OLI计算	2000,2010,2020	正向	30
	物种丰富度	以往研究[31-37]	2000,2010,2020	正向	30
	Simpson多样性指数	以往研究[31-37]	2000,2010,2020	正向	30
	Shannon-Weiner多样性指数	以往研究[31-37]	2000,2010,2020	正向	30
水资源	水域面积	Global Surface Water网站（https://global-surface-water.appspot.com）	2000,2010,2020	正向	30
	地下水埋深	以往研究[31-37]	2000,2010,2020	负向	30

准化，并且用熵值法[41]与PCA计算2000、2010年和2020年研究区土壤肥力指数。

（3）沙漠化、盐渍化数据

为了评估研究区在生态输水期间沙漠化/盐渍化程度的变化，本研究首先基于Landsat 7/8 LOI数据计算土地荒漠化指数[38]、标准化差异土壤指数、土壤调节植被指数和土壤盐渍化指数[42]。然后，通过与3 km×3 km滑动窗口法计算的裸地密度数据结合，用PCA计算盐渍化/沙漠化综合指数。

（4）生物多样性和水资源数据

植被数据：由于天然植被对维持区域生物多样性起到重要作用，因此本研究选择植被覆盖和植物多样性相关的常用指标来代表生物多样性。首先，选用基于Landsat 7/8 OLI数据计算的归一化植被指数、增强植被指数、土壤调节植被指数和MODIS的叶面积指数产品来反映研究区植被生长情况；然后，用3 km×3 km滑动窗口法计算植被指数和叶面积指数的标准差；最后，用PCA得到植被概况综合指数。

水资源：因研究区缺乏地表（下）水相关的监测数据，基于Landsat LOI数据计算水体指数，得到研究区水域面积。随后，用3 km×3 km的滑动窗口，对研究区内每9 km^{2}范围内的像元进行合计，以此得到地表水域栅格数据。

物种多样性及地下水埋深数据：为了得到研究区植物物种多样性和地下水数据，首先用“塔里木河下游”“地下水”“多样性”“生态输水”和“物种丰富度”等关键词的中英文在Google Scholar，Web of Science和CNKI等数据库进行文献搜索，得到507条搜索结果，然后根据文献与主题的相关情况筛选出183篇文章建立文献数据库。然后，用Plot Digitizer（plot digitizer.com）从文章中提取地下水位（或埋深）、离河道距离、Shannon-Weiner、Simpson多样性指数、物种丰富度、经纬度等或地名等数据。最后，得到研究区2000、2010年和2020年的633条地下水埋深

和987条植物物种多样性数据。

基于水体面积数据用滑动窗法计算离河道距离。根据以往研究[31-37]和地下水、多样性指数与归一化植被指数相关指标间的相关分析结果，选取离河道距离、归一化植被指数、土壤盐渍化指数、地表温度、土地类型等与地下水和物种多样性关系较密切的变量，用随机森林机器学习算法构建Simpson多样性指数、Shannon-Weiner多样性指数、物种丰富度和地下水埋深的预测模型，从而计算得到研究区物种多样性和地下水埋深栅格数据，空间分辨率均为1 km×1 km。然后，用0~1 m、1~1.5 m、1.5~2 m（土壤积盐阈值）、2~3 m、3~3.5 m、3.5~4 m、4.0~4.5 m（植物凋萎阈值）、>5 m分类标准，将地下水埋深栅格数据分类，并通过专家打分、层次分析和加权平均法得到地下水环境综合指数。最后，与水域面积数据结合用PCA计算水环境综合指数。针对多样性数据，用PCA进行降维正交处理，得到研究区植物多样性综合指数数据。进行分析前，使用*K*-近邻和一般线性模型等方法对以上数据进行了空间分辨率统一化，统一到1 km。

1.3 研究方法

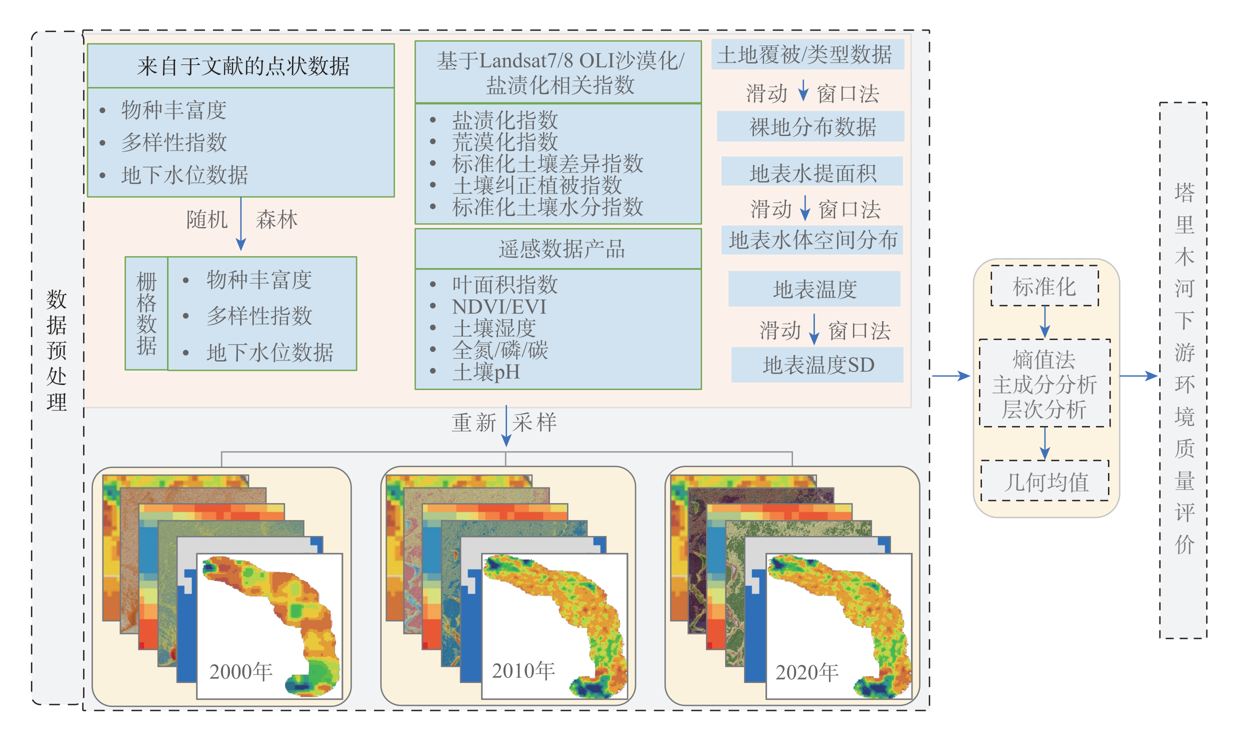
各环境要素对EQI的贡献之间有差异，因此当进行自然环境质量评估时，需要确定各指标的权重。常用的确定权重方法有层次分析、熵值法和PCA等。各方法均有优点和缺点。为了有效和科学地计算研究区的EQI，本研究先用以上的3种方法计算各要素对EQI的贡献权重，其后通过求几何平均值确定各要素的最终权重（W_j）。最终，通过加权平均法计算研究区的EQI。计算公式如下：

$$W_j = \sqrt[3]{w_j^e w_j^a w_j^p} \tag{1}$$

$$\mathrm{EQI} = \sum_i^n w_j V_j \tag{2}$$

式中：w_j^a、w_j^e、w_j^p 分别为用层次分析、熵值法、PCA来计算的第j个变量的权重；V_j 为第j个变量；w_j 为通过几何均值得到的第j变量的权重。得到环境质量指数栅格数据后，用自然断点分级法将环境质量分为7个等级：很差（EQI<0.3）、较差（0.3≤EQI<0.4）、差（0.4≤EQI<0.5）、一般（0.5≤EQI<0.6）、良好（0.6≤EQI<0.8）、较好（0.8≤EQI<0.9）和很好（EQI≥0.9）。

最后，用转移矩阵、方差分析多重比较和回归分析，探讨了环境质量和生态输水量之间的关系。数据预处理、分析和制图均由ArcMap 10.3和R软件完成（图2）。



注：NDVI为归一化植被指数；EVI为增强植被指数；SD为标准差。

图2 环境质量指数的计算过程

Fig. 2 Calculation process of environmental quality index

2 结果与分析

2.1 自然环境质量的时空格局

2000—2020年，塔里木河下游环境质量得到显著改善。2000年环境质量较差（0.3≤EQI<0.4）、差（0.4≤EQI<0.5）和一般（0.5≤EQI<0.6）区域分别占研究区面积的16.60%、24.53%和16.00%，环境质量良好（0.6≤EQI<0.8）区域仅占7.26%（图3~4）。至2010年，EQI均值从0.37增至0.39，环境质量较差及以下区域面积从5092.92 km^2下降至4950.69 km^2，环境质量一般区域面积从481.65 km^2增加至1301.92 km^2（图3~4）。EQI均值持续增至2020年的0.41，环境质量较好及以上区域扩大到2283.54 km^2，而环境质量较差及以下区域缩减到4352.93 km^2（图3~4）。

空间分布上，自然环境质量较好的区域集中在河道和湖盆周边，且EQI较高区域的连通度在增加，台特玛湖周边改善尤为明显（图3）。2000—2010年，环境质量明显改善（改善区域面积为15620 km^2）（图5），而2010—2020年改善区域略有下降（改善区域面积为13831 km^2）（图5和表2）。2000—2020年，EQI的负向变化主要出现在环境质量一般及以上（EQI≥0.5）的区域内（表2），但总体环境质量仍保持较高水平。

2.2 自然环境质量变化与输水量的关系

2000—2020年，塔里木河下游流域不同等级EQI呈现出整体增加的趋势。具体而言，很差（EQI<0.3）与较好（0.8≤EQI<0.9）等级的EQI逐年上升。较差（0.3≤EQI<0.4）及一般（0.5≤EQI<0.6）等级的EQI在2000—2010年变化不明显，在2010—2020年发生了显著变化。相比之下，差（0.4≤EQI<0.5）与良好（0.6≤EQI<0.8）等级的EQI在研究时段内虽有波动，但变化并不显著（图6）。

回归分析表明，环境质量良好及以上（EQI≥0.6）的区域面积变化与生态输水量呈正相关（r=0.56），而环境质量差及以下（EQI<0.5）和一般（0.5≤EQI<0.6）的区域面积变化与生态输水量呈负相关（r=−0.44和r=−0.75），说明生态输水对EQI偏低和中等区域有抑制作用，对偏高区域有促进作用（图7）。

3 讨 论

3.1 自然环境质量的时空格局

本研究显示，自2000年至2020年，塔里木河下游环境质量显著改善，与以往研究结果一致[43-47]。尤其是地表温度，其从2000年的33.22 ℃下降至2020年的28.98 ℃，这可能与胡杨林生长状况改善相关。森林通过吸收CO_2和水分蒸腾，降低气温，增加湿度，对周围环境产生冷却效应，并促进云层形成及阳光反射，保护地表免受热浪侵袭[48-50]。虽然胡杨林总面积未显著变化，但冠幅面积显著增加[51]，通过植被蒸腾和遮蔽效应改善了局部小气候。空间上看，环境质量显著改善主要集中在河床两岸，而远离河道的边缘区环境状况依然恶劣（图3），其与以往研究结果也比较一致[52]。这些区域地下水埋深大且远离河床，难以获得生态输水的有效补给。另外，绿洲扩展破坏了原有草本和小灌木植被[53-55]，从而远离河道边缘区环境质量依然较差。虽然塔里木河下游环境质量有所改善，但土壤质量，特别是有机碳储量并未显著增加甚至下降。这可能与土地覆被类型变化相关。虽然生态输水增加了芦苇等草本植被覆盖率[44,53]，但大型木本植物如胡杨

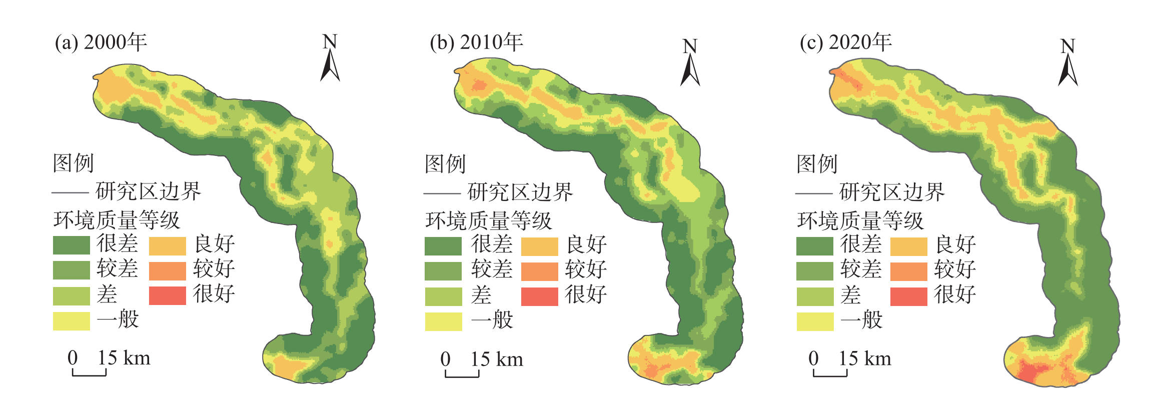


图3 塔里木河下游环境质量的历年变化

Fig. 3 Annual changes of environmental quality in the lower reaches of Tarim River

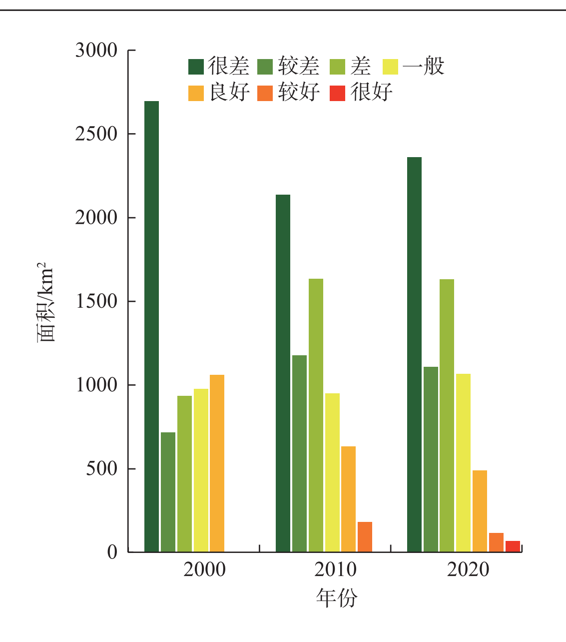


图4 塔里木河下游各环境质量等级面积变化

Fig. 4 Area changes of each environmental quality grade in the lower reaches of Tarim River

和柽柳的面积变化不大[44]。农田扩展减少了植物枯枝残体对土壤的输入[47,56]。此外，在下游低植被覆盖区，由于强烈的蒸发和地下水位的过度提升，可能会导致土壤盐渍化和耐旱植物的死亡[49]，从而导致了土壤碳储量的下降。

3.2 生态输水对自然环境质量的影响

本研究发现，塔里木河下游环境质量较差及以下(EQI<0.4)和较好(0.8≤EQI<0.9)区域EQI显著增加，而环境质量差和良好区域变化不明显。这可能与自然环境质量的空间格局及离河床距离相关。环境质量较好区主要分布在近河道区(图1、图5)，输水后植被覆盖增加，从而导致这些区域的EQI增加。环境质量差(0.4≤EQI<0.5)及良好区域(0.6≤EQI<0.8)集中于远离河床和大西海子水库的植被较稀少区域(图1、图5)。因地下水补给不足，生态输水在这些区域作用可能有限。另外，植被稀少区土壤种子库密度小[57]，土壤水分改善不足以激活种子萌发，因此植被覆盖未显著增加，甚至地下水位过高导致盐渍化，减少了耐旱草本植物面积[56]。因此，环境质量处于差及良好水平区域的EQI并未发生显著变化。

另外，2000—2010年的EQI改善幅度大于2010—2020年(图5)。Dou等[44]的研究也得到类似的结果。植物与环境要素之间存在量效关系[58]。前期(2000—2010年)输水缓解了干旱胁迫，促进土壤种子萌发，从而增加了植被覆盖率，但到后期(2010—2020年)，远离河道区仍缺水，河两岸植被对水分可能有一定的饱和状态，因此虽然2010—2020年的总输水量增加了3倍[47]，但环境质量却未显著上升。随着输水量的增加，环境质量一般及以下的区域面积减少，良好及以上区域面积增加(图7)。生态输水改善了土壤水分和养分条件，促进了种子扩散和萌发，提高了植被覆盖率，降低了地表温度，增加了物种多样性和植被生产力。这些变化改善了塔里木河下游自然环境，使得环境质量一般及以下的区域

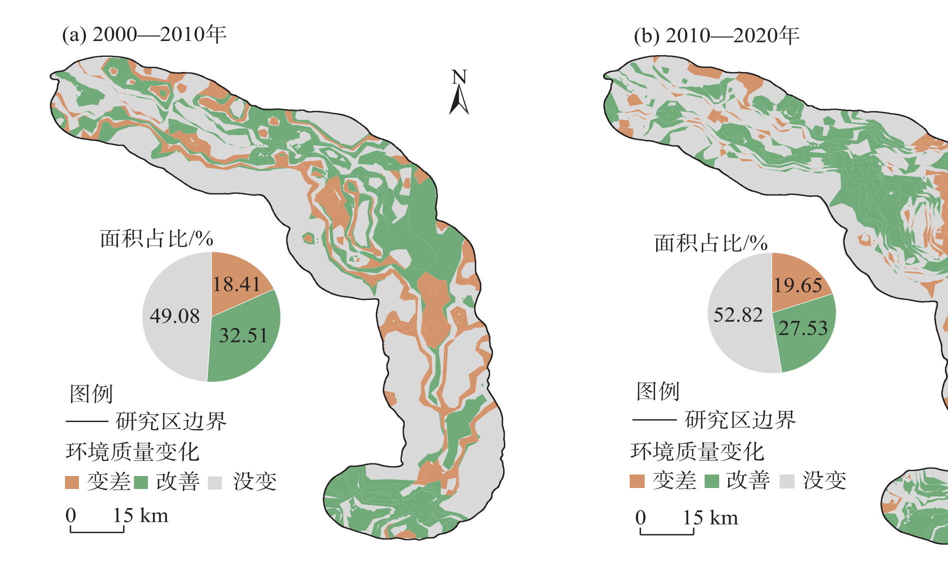


图5 塔里木河下游环境质量变化

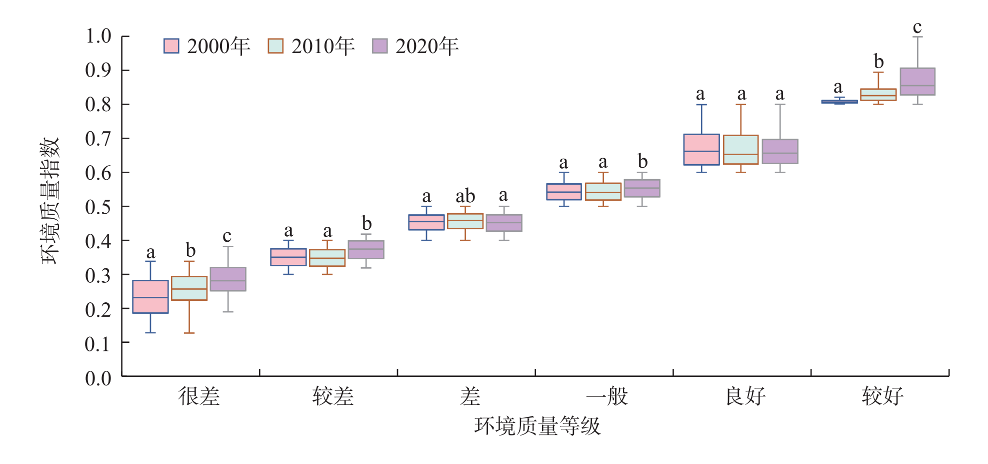
Fig. 5 Changes of environmental quality in the lower reaches of Tarim River

表2　塔里木河下游环境质量变化转移矩阵

Tab. 2　Transition matrix of different EQI from 2000 to 2020 in the lower reaches of Tarim River　/km²

环境质量等级		2000年				
		差	很差	较差	良好	一般
2010年	差	709.80	42.09	142.22	18.82	282.34
	很差	0.49	1470.10	93.02	–	–
	较差	199.70	192.85	459.94	–	5.11
	较好	–	0.14	–	79.44	0.01
	良好	41.52	8.17	49.85	219.12	138.99
	一般	238.40	15.72	57.02	31.74	345.59

环境质量等级		2010年					
		差	很差	较差	较好	良好	一般
2020年	差	349.66	39.24	170.70	–	10.31	107.36
	很差	290.14	1345.17	295.78	–	0.09	49.17
	很好	0.07	–	–	40.29	7.66	0.06
	较差	106.51	142.47	235.03	–	3.22	30.92
	较好	14.18	–	6.18	31.18	72.73	5.07
	良好	141.31	17.85	76.21	8.08	313.84	213.88
	一般	292.68	18.50	73.57	–	49.42	281.98



注：不同小写字母表示环境质量指数区间的方差分析多重比较结果存在显著性差异。

图6　2000、2010年和2020年塔里木河下游环境质量指数的多重比较

Fig. 6　Multiple comparison of environmental quality index in the lower reaches of Tarim River in 2000, 2010, and 2020

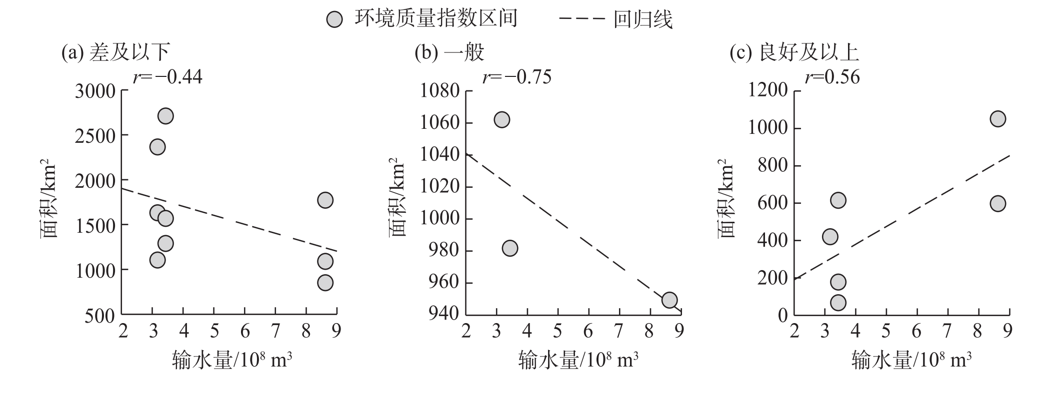


图7　塔里木河下游不同环境质量指数等级所占面积与输水量的关系

Fig. 7　Relationship between the area with different environmental quality index classes and the amount of water delivered in the lower reaches of Tarim River

面积逐渐缩减，而质量良好及以上的区域则逐渐扩张(图7)，环境质量总体上得到了提升。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 在生态输水的积极影响下，塔里木河下游的自然环境质量得到了显著改善。从2000年到2010年，环境质量指数(EQI)平均值从0.37提升至0.39，环境质量差及以下(EQI<0.5)的区域面积减少了2.8%，从5092.92 km^2降至4950.69 km^2。

(2) 环境质量较好的区域面积增长了170%，从2000年的481.65 km^2大幅增加到2020年1301.92 km^2。塔里木河下游环境质量处于较好及以上的区域主要集中在河道两岸和湖盆周边。2000—2010年环境质量改善区域面积达到15620 km^2，而在2010—2020年下降至13831 km^2。尽管环境质量变差主要出现在一般及以上(EQI≥0.5)的区域，总体环境质量仍然处于较高水平。环境质量较差及以下和较好的区域EQI增加显著，而环境质量一般的区域增加不明显。

(3) 生态输水量对环境质量处于一般、差及以下区域面积有抑制作用，对良好及以上区域面积有促进作用。这些积极变化表明，生态输水措施对于改善塔里木河下游的自然环境具有显著效果。

4.2 存在的挑战和建议

自2000年以来，塔里木河下游接受了24次生态输水，总水量为8.45×10^9 m^3，虽然环境有所改善，但仍有提升空间。具体来说：(1) 生态输水效果空间分布不均匀，河道附近改善显著，而绿洲边缘仍需改善。(2) 植被覆盖率虽增，但胡杨林等关键群落仍未显著改善，在台特玛湖和河岸植被稀少区域物种多样性下降。(3) 植被稀少区域因地下水位抬升出现盐渍化，导致胡杨幼苗及耐寒草本植物的死亡和部分区域土壤有机碳库的下降。(4) 长期人为供水过多及盐渍化可能导致胡杨林群落向耐盐植物群落的逆行演替，降低生态系统碳汇功能。(5) 输水不规律性和缺乏科学性导致蒸发耗水量的增加。(6) 环境质量虽有改善，塔里木河下游环境仍脆弱[37]。因此，未来修复工作中需要考虑以下措施：

(1) 为了促进胡杨和草本植物的更新与恢复，可在胡杨生长区通过修建堤坝、小渠等扩大河水的蔓延，利用塔里木河下游河岸带良好的土壤种子库，在适宜条件下促使胡杨发芽生长，远离河道区植被有效恢复。(2) 考虑生态系统演替特征。长期人为干预可能引发植物群落的演替。土壤水盐增加对胡杨幼苗不利，但对柽柳影响较小[59]。在胡杨覆盖较低区，地下水位和盐分上升可能导致胡杨向柽柳群落演替，降低碳储量。因此，在输水时需定期监测土壤水盐和河岸生态系统群落组成，避免人为输水可能带来的负面影响。(3) 科学规划输水。气候变化可能会影响塔里木河流域水热格局，涉及蒸发量、融雪以及植物物候、扩散、生长和繁殖等。因此，放水时，需综合考量，科学选定输水时间和输水量，以提高生态效益、减少无效水耗。(4) 重视车尔臣河作用。近20 a，车尔臣河径流增加[60]，其至台特玛湖距离小于离大西海子水库，水流落差大[28,44]。在车尔臣河汇入台特玛湖的流程中，水量单位消耗低于塔里木河，对台特玛-康拉克湖水域面积变化影响大[60]。因此，在塔里木河下游生态修复中，应重视车尔臣河的作用。(5) 提高水资源的利用效率，避免破坏天然植被，以改善环境质量。虽然环境质量有所改善，但仍脆弱。与20世纪70年代相比，关键种如胡杨覆盖面积依然偏低[46-47]。农业上，通过节水灌溉和种植耐旱耐盐植物，如罗布麻，可显著减少灌溉需水量[56]。同时，提高塔里木河上游灌溉效率对下游生态修复至关重要。目前，上游单位灌溉用水量接近同期新疆平均单位灌溉用水量的2倍，导致了大量盐碱地的出现。因此，若将上游灌溉用水量降至全疆平均水平，不仅可减少盐碱地、增加产量，还可以为下游提供近现在5倍的水量[61]。

参考文献(References)

[1] 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 482-490. [Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong, et al. Impact of the glacial change on water resources in the Tarim River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 482-490.]

[2] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [Zhang Pei. Research on the coupling system of society, ecoenvironment and water in Tarim River Basin[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.]

[3] Huang X. Culture on the Silk Road[M]. Hangzhou: Zhejiang People's Publisher, 1995.

[4] 张静. 旱区地下水位变化引起的表生生态效应及其评价——以天山北麓中段为例[D]. 西安: 长安大学, 2011. [Zhang Jing.

Study on supergene ecological effect and evaluate excited by groundwater level: Take the middle of the northern piedmont of Tianshan as an example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.]

[5] 胡明芳, 田长彦, 赵振勇, 等. 新疆盐碱地成因及改良措施研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 111-117. [Hu Mingfang, Tian Changyan, Zhao Zhenyong, et al. Salinization causes and research progress of technologies improving saline-alkali soil in Xinjiang[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2012, 40(10): 111-117.]

[6] 吴彬, 杜明亮, 穆振侠, 等. 1956—2016年新疆平原区地下水资源量变化及其影响因素分析[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 659-669. [Wu Bin, Du Mingliang, Mu Zhenxia, et al. Analysis of changes in groundwater resources and influencing factors in Xinjiang plain area from 1956 to 2016[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(5): 659-669.]

[7] 姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 新疆气候水文变化趋势及面临问题思考[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1498-1511. [Yao Junqiang, Chen Jing, Tuoliwubieke Dilinuer, et al. Trend of climate and hydrology change in Xinjiang and its problems thinking [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5): 1498-1511.]

[8] 卢琦, 吴波. 中国荒漠化灾害评估及其经济价值核算[J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(2): 31-35. [Lu Qi, Wu Bo. Assessment of desertification disasters and economic value accounting in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2002, 12(2): 31-35.]

[9] 袁榴艳, 杨改河. 新疆绿洲可持续发展评估研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 54-58. [Yuan Liuyan, Yang Gaihe. Study on the assessment of sustainable development of the oasis in Xinjiang Province[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2004, 32(6): 54-58.]

[10] Bao Y S, Cheng L L, Bao Y F, et al. Desertification: China provides a solution to a global challenge[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2017, 4(4): 402-413.

[11] Chen Y N, Chen Y, Xu C, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater dynamics and riparian vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 170-177.

[12] 王振, 李均力, 张久丹, 等. 输水漫溢对塔里木河中游胡杨林恢复的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 94-102. [Wang Zhen, Li Junli, Zhang Jiudan, et al. Influences of ecological water conveyance on *Populus euphratica* forest restoration in the middle reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 94-102.]

[13] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响 [J]. 地理学报, 2003, 58(4): 542-549. [Chen Yaning, Li Weihong, Xu Hailiang, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4), 542-549.]

[14] Zhao T, Yang Y, Mu X H. Monitoring dynamic changes of vegetation cover in the Tarim River Basin based with landsat imagery and Google Earth Engine[C]//2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE, 2021: 4834-4837.

[15] 买尔当·克依木, 玉米提·哈力克, Florian B. 输水影响下胡杨胸径生长量时空变化[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(2): 148-154. [Keyimu Maierdang, Halik Umut, Florian B, et al. Spatial-temporal change of DBH of *Populus euphratica* under artificial water conveyances[J]. Journal of Forest and Environment, 2016, 36(2): 148-154.]

[16] 袁祯燕, 杜东伟. 基于EOS-MODIS的塔里木河下游应急输水以来的植被响应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 154-158. [Yuan Zhenyan, Du Dongwei. Studies on vegetation response to emergency water transportation to Tarim River based on EOS-MODIS[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(9): 154-158.]

[17] 张久丹, 李均力, 包安明, 等. 2013—2020年塔里木河流域胡杨林生态恢复成效评估[J]. 干旱区地理, 2023, 45(6): 1824-1835. [Zhang Jiudan, Li Junli, Bao Anming, et al. Effectiveness assessment of ecological restoration of *Populus euphratica* forest in the Tarim River Basin during 2013—2020[J]. Arid Land Geography, 2023, 45(6): 1824-1835.]

[18] 陈超群, 吴煜, 王健, 等. 生态输水前后塔里木河干流生态系统服务价值的变化过程[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 100-103, 8. [Chen Chaoqun, Wu Yu, Wang Jian, et al. An analysis of the ecosystem service value in the mainstream of the Tarim River before and after the ecological water conveyance[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9): 100-103, 8.]

[19] 王希义, 彭淑贞, 徐海量, 等. 大型输水工程的生态效益与社会经济效益评价——以塔里木河下游为例[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 308-314. [Wang Xiyi, Peng Shuzhen, Xu Hailiang, et al. Evaluation of ecological and social-economic benefits of large water conveyance projects: A case study on the lower reaches of the Tarim River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(2): 308-314.]

[20] Peche R, Rodríguez E. Development of environmental quality indexes based on fuzzy logic: A case study[J]. Ecological Indicators, 2012, 23: 555-565.

[21] Mahmoudzadeh H, Abedini A, Aram F, et al. Evaluating urban environmental quality using multi criteria decision making[J]. Heliyon, 2024, 10(3): e24921, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24921.

[22] Jiao A Y, Wang W Q, Ling H B, et al. Effect evaluation of ecological water conveyance in Tarim River Basin, China[J]. Frontiers in Environnemental Science, 2022, 10: 1019695, doi: 10.3389/fenvs.2022.1019695.

[23] Zhang X M, Zhang X L, Zhang Z H, et al. Measures, methods and cases of river ecological restoration[C]//OP Conference Series: Earth and Environmental Science. The International Workshop on Green Energy, Environment and Sustainable Development. Wei-

hai, China: Purpose-Led Publishing, 2020.

[24] Ling H B, Guo B, Zhang G P, et al. Evaluation of the ecological protective effect of the "large basin" comprehensive management system in the Tarim River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1696-706.

[25] Wang Q X, Chen X K, Peng W Q, et al. Changes in runoff volumes of inland terminal lake: A case study of Lake Daihai[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(11): e2021EA001954, doi: 10.1029/2021EA001954.

[26] 刘桂林, 艾里西尔·库尔班, 玉米提·哈力克, 等. 基于变化轨迹探测的植被景观格局动态分析——以塔里木河下游生态输水区域为例[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1472-1478. [Liu Guilin, Kurban Alishir, Halik Umut, et al. Dynamic analysis of vegetation landscape pattern based on change trajectory detection: Taking the ecological water conveyance area downstream of Tarim River as an example[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1472-1478.]

[27] 阿布都米吉提·阿布力克木, 阿里木江·卡斯木, 艾里西尔·库尔班, 等. 近40年台特玛-康拉克湖泊群水域变化遥感监测[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 46-54. [Ablekim Abdimijit, Kasimu Alimujiang, Kurban Alishir, et al. Monitoring the water area changes in Tetima-Kanglayka lakes region over the past four decades by remotely sensed data[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(1): 46-54.]

[28] 樊自立, 徐海量, 傅荩仪, 等. 台特玛湖湿地保护研究[J]. 第四纪研究, 2013, 33(3): 594-602. [Fan Zili, Xu Hailiang, Fu Jinyi, et al. Study on protection of wetland of Taitema Lake[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(3): 594-602.]

[29] Aishan T, Halik U, Kurban A, et al. Eco-morphological response of floodplain forests (*Populus euphratica* Oliv.) to water diversion in the lower Tarim River, northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2): 533-545.

[30] Zay C. EP IPBES 联合国环境规划署[R]. 北京: 联合国环境规划署, 2012. [Zay C. EP IPBES United Nations environment programme[R]. Beijing: UNEP, 2012.]

[31] 徐至远, 邵丽盼·卡尔江, 林涛, 等. 地下水位对生态输水的响应过程模拟[J]. 水文, 2022, 42(5): 70-75. [Xu Zhiyuan, Kaerjiang Shaolipan, Lin Tao, et al. Simulation of response of groundwater level to ecological water conveyance[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(5): 70-75.]

[32] 阿德·阿布拉. 塔里木河下游地下水恢复需水量研究[J]. 陕西水利, 2022(6): 37-39. [Abula Ade. Research on the water demand for groundwater restoration in the lower reaches of the Tarim River [J]. Shaanxi Water Resources, 2022(6): 37-39.]

[33] 陈龙. 塔里木河下游生态输水后地下水埋深趋势规律分析[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(5): 72-74, 113. [Chen Long. Analysis of the trend of groundwater depth after ecological water transfer in the lower reaches of the Tarim River[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2022, 50(5): 72-74, 113.]

[34] 阿依姆古丽·赛麦提, 吐尔逊·哈斯木, 郭冬. 近20 a来塔里木河下游下段典型剖面地下水位对生态输水响应分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 43-51. [Saimati Ayimuguli, Kasim Tursun, Guo Dong. Analysis of the response of groundwater level to ecological water transport in typical profiles in the lower reaches of the Tarim River in recent 20 years[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 44(1): 43-51.]

[35] 董宗炜, 徐至远, 张鹏. 生态输水对台特玛湖面积和植被的影响[J]. 水利规划与设计, 2022(3): 64-66, 88. [Dong Zongwei, Xu Zhiyuan, Zhang Peng. The impact of ecological water supply on the area and vegetation of Lake Taitema[J]. Water Resources Planning and Design, 2022(3): 64-66, 88.]

[36] 希丽娜依·多来提, 阿里木江·卡斯木, 如克亚·热合曼, 等. 基于四种水体指数的艾比湖水面提取及时空变化分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 134-140. [Duolaiti Xilinayi, Kasim Alim, Reheman Rukeya, et al. Water body extraction of Ebinur Lake based on four water indexes and analysis of spatial-temporal changes[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39 (10): 134-140.]

[37] 白涛, 姬宏伟, 邓铭江, 等. 注重荒漠区胡杨林生态保护与修复的汉渗轮灌研究[J]. 水利学报, 2022, 53(1): 31-42. [Bai Tao, Ji Hongwei, Deng Mingjiang, et al. Study on the ditch rotation irrigation for ecological protection and restoration of *Populus euphratica* forests in the desert area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(1): 31-42.]

[38] Shan W, Jin X B, Ren J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118126, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118126.

[39] Zeng Y N, Feng Z D, Xiang N P. Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment[C]//Proceedings of the IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska: IEEE, 2004: 4306-4309.

[40] Kappal S. Data normalization using median absolute deviation MMAD based Z-score for robust predictions vs. min-max normalization[J]. London Journal of Research in Science: Natural and Formal, 2019, 19(4): 39-44.

[41] Gongnet E E, Agbangba C E, Affossogbe T S A, et al. Spatial prediction of soil organic matter in Adingnigon (Benin) using Bayesian maximum entropy (BME)[J]. African Journal of Applied Statistics, 2022, 9(1): 1279-1295.

[42] Abuelgasim A, Ammad R. Mapping soil salinity in arid and semi-arid regions using Landsat 8 OLI satellite data[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019, 13: 415-425.

[43] Wang Y, Zhang S, Zhen H, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in ecosystem service values based on land use/cover change in the Tarim River Basin, China[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7759, doi: 10.3390/su12187759.

[44] Dou X, Ma X F, Huo T C, et al. Assessment of the environmental effects of ecological water conveyance over 31 years for a terminal lake in Central Asia[J]. Catena, 2022, 208: 105725, doi: 10.1016/j.catena.2021.105725.

[45] Wang X Y, Peng S Z, Ling H B, et al. Do ecosystem service value increase and environmental quality improve due to large-scale ecological water conveyance in an arid region of China?[J]. Sustainability, 2019, 11(23): 6586, doi: 10.3390/su11236586.

[46] Jiao A Y, Wang Z K, Deng X Y, et al. Eco-hydrological response of water conveyance in the mainstream of the Tarim River, China [J]. Water, 2022, 14(17): 2622, doi: 10.3390/w14172622.

[47] Chen Y N, Chen Y P, Zhu C G, et al. Ecohydrological effects of water conveyance in a disconnected river in an arid inland river basin [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1-11.

[48] Boulton C A, Lenton T M, Boers N. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(3): 271-278.

[49] Lawrence D, Coe M, Walker W, et al. The unseen effects of deforestation: Biophysical effects on climate[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2022, 5: 756115, doi: 10.3389/ffgc.2022.756115.

[50] Kreier F. Tropical forests have big climate benefits beyond carbon storage[J]. Nature, 2022, 1: 35365819, doi: 10.1038/d41586-022-00934-6.

[51] Lang P, Ahlborn J, Schäfer P, et al. Growth and water use of *Populus euphratica* trees and stands with different water supply along the Tarim River, NW China[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 380: 139-148.

[52] 高庆, 艾里西尔·库尔班, 肖昊. 塔里木河下游区域植被时空变化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 624-632. [Gao Qing, Kurban Alishir, Xiao Hao. Spatiotemporal variation of vegetation in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 624-632.]

[53] Cui H H, Zhang G H, Wang Q, et al. Study on index of groundwater ecological function crisis classification and early warning in northwest China[J]. Water, 2022, 14(12): 1911, doi: 10.3390/w14121911.

[54] Yu X, Lei J Q, Gao X. An over review of desertification in Xinjiang, northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(11): 1-15.

[55] Yin X W, Feng Q, Li Y, et al. An interplay of soil salinization and groundwater degradation threatening coexistence of oasis-desert ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150599, doi: 10. 1016/j.scitotenv.2021.150599.

[56] Li W W, Jia S N, He W, et al. Analysis of the consequences of land-use changes and soil types on organic carbon storage in the Tarim River Basin from 2000 to 2020[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 327: 107824, doi: 10.1016/j.agee.2021.107824.

[57] Zhou S H, Liu D D, Zhu M Y, et al. Temporal and spatial variation of land surface temperature and its driving factors in Zhengzhou City in China from 2005 to 2020[J]. Remote Sensing, 2022, 14 (17): 4281, doi: 10.3390/rs14174281.

[58] Jiang B, Larsen L, Deal B, et al. A dose-response curve describing the relationship between tree cover density and landscape preference[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 139: 16-25.

[59] Li J, Yu B, Zhao C, et al. Physiological and morphological responses of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* to altered groundwater availability[J]. Tree Physiology, 2013, 33(1): 57-68.

[60] 艾克热木·阿布拉, 阿布都米吉提·阿布力克木, 安外尔·艾则孜, 等. 塔里木河和车尔臣河对台特玛-康拉克湖水域面积变化影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 3(1): 52-57. [Abula Aikeremu, Ablekim Abdimilit, Eziz Anwar, et al. Influence of Tarim River and Qarqan River on water area change of Tetima-Kanglayka Lakes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 3(1): 52-57.]

[61] Xu H L, Ye M, Li J M. The water transfer effects on agricultural development in the lower Tarim River, Xinjiang of China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(1): 59-68.

Evaluation of the ecological water conveyance benefits in the lower reaches of Tarim River based on environmental quality index

Ailikemu SILAYIN[1], Anwar EZIZ[2], Tajiguli KASIMU[2], SHI Zhiwen[2], XU Junyu[2,3], Ziwargul KIBIR[2,3], Umut HALIK[3], Alishir KURBAN[2]

(1. Tarim River Management Bureau of Xinjiang Autonomous Region, Korla 841000, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: The environmental quality index (EQI) is a comprehensive metric for evaluating the quality of the natural environment, integrating components such as climate, water resources, soil, topography, and biodiversity. Using data from satellite imagery, field observations, and published literature, EQI of the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China in 2000, 2010 and 2020 was calculated by entropy, principal component analysis, and hierarchical analysis methods. The findings revealed that: (1) Ecological water conveyance significantly improved the natural environmental quality in the lower reaches of Tarim River from 2000 to 2020. High EQI regions were primarily concentrated near riverbanks and the lake basin. (2) From 2000 to 2010, environmental quality improvement was more pronounced, with 15620 km^2 increase in improved areas, compared to 13831 km^2 increase from 2010 to 2020. (3) The EQI classified as poor (EQI<0.4) and very good (EQI≥0.8) increased significantly, whereas the below-average (0.4≤EQI<0.5) and good (0.6≤EQI<0.8) EQI classes showed no significant change. These results demonstrate the effectiveness of the overall ecological water conveyance strategy in enhancing environmental quality by reducing low and medium EQI areas and expanding high EQI areas.

Key words: environmental quality index; comprehensive assessment; multi-source data; lower reaches of Tarim River